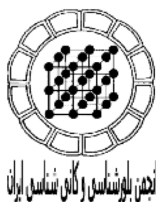
مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

سال بیست و هفتم، شمارهٔ اول، بهار ۹۸، از صفحهٔ ۶۹ تا ۸۲



شیمی کانی‌های گارنت و کلینوپیروکسن در اسکارن سرانجیک و شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل آن‌ها در قروه، استان کردستان

زهره اعلمی‌نیا*، سیدمحمدحسین رضوی، بهزاد مهرابی

گروه ژئوشیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، ایران

(دریافت مقاله: ۹۶/۱۱/۷، نسخه نهایی: ۹۷/۳/۲۸)

چکیده: اسکارن سرانجیک در اثر تزریق توده نفوذی با ترکیب گرانیتی قروه به سن ژوراسیک پسین در سنگ‌های کربناتی ناخالص تشکیل شده است. بازدیدهای صحرایی و بررسی‌های کانی‌شناسی نشان داد که برون اسکارن، گسترده‌ترین افق اسکارنی در اسکارن سرانجیک بوده و از نوع کلسیمی به‌همراه لبه باریکی از کانی‌های اسکارن منیزیمی است. مجموعه کانی‌ها نشان‌دهنده دو مرحله پیشرونده و پسرونده است. مرحله پیشرونده بیشتر توسط کانی‌های گارنت و کلینوپیروکسن مشخص می‌شود. شواهد بافتی و تجزیه شیمیایی به روش ریزپردازش الکترونی (EPMA) کانی‌های گارنت و کلینوپیروکسن نشان داد که دو نوع کلینوپیروکسن و سه نوع گارنت در پهنه‌های گوناگون طی مرحله پیشرونده در دگرگونی اسکارن وجود دارد. کلینوپیروکسن نوع I با دو ترکیب سالیت (Hd_{27-40} Di_{58-51} Jo_{8-14}) و فروسالیت (Hd_{58-75} Di_{27-16} Jo_{8-13}) به ترتیب در پهنه‌های فورستریت-کلینوپیروکسن و گارنت-وزوویانیت-کلینوپیروکسن دیده می‌شود. کلینوپیروکسن نوع II با ترکیب حدواسط سالیتی- فروسالیتی (Hd_{36-48} Di_{43-51} Jo_{7-12}) در پهنه گارنت-وزوویانیت-کلینوپیروکسن گسترش دارد که همراه با تبلور شیلیت مشخص می‌شود. گارنت‌ها بیشتر در پهنه‌های میانی تا نزدیک به توده نفوذی قرار دارند. گارنت نوع I با ترکیب گراندیتی غنی از گروسولر (Grs_{65} And_{25} تا Grs_{45} And_{40}) با نسبت پیرالسپیتی کمتر از ۱۰درصد مولی مشخص می‌شود و شواهد بافتی تبلور همزمان آن I و کلینوپیروکسن نوع I را تایید می‌کند و در پهنه گارنت-وزوویانیت-کلینوپیروکسن گسترش یافته است. گارنت نوع II با ترکیبی از Grs_{50} And_{25} Pyr_{25} تا Grs_{45} And_{20} Pyr_{35} و گارنت نوع III با ترکیبی از Grs_{70} Pyr_{30} تا Grs_{60} Pyr_{40} در مقایسه با گارنت نوع I دربردارنده پیرالسپیت بیشترند و در مجاورت توده نفوذی قرار دارند. بر اساس مجموعه‌های کانیایی، گارنت نوع I در شرایط اکسایشی در پهنه‌های دورتر نسبت به گارنت نوع II و III ایجاد شده است. از طرفی، به نظر می‌رسد که نسبت‌های گارنت به کلینوپیروکسن مشاهده شده در اسکارن سرانجیک از حجم بالای فلوئور ناشی از سیال ماگمایی ناشی شده باشد. هم‌چنین، حضور فلوئور بالا در محیط سبب افزایش درصد حجمی وزوویانیت و کاهش به نسبت شدید درصد حجمی کلینوپیروکسن شده است. ترکیب نسل‌های گوناگون کلینوپیروکسن و گارنت در اسکارن سرانجیک قروه نشان-دهنده روند دگرگونی اسکارن پیشرونده از شرایط نسبتاً اکسایشی تا نسبتا احیایی و گریزندگی اکسیژن معادل با ۱۸- تا ۳۰- است.

واژه‌های کلیدی: *ترکیب شیمیایی؛ گارنت؛ کلینوپیروکسن؛ اسکارن سرانجیک؛ قروه؛ کردستان.*

مقدمه

نوع اسکارن تشکیل شده به شرایط زمین‌شناسی، ترکیب سنگ‌های میزبان و سنگ‌های آذرین وابسته به آن، عمق تشکیل و گریزندگی اکسیژن و گوگرد بستگی دارد [۱- ۷]. اگرچه نوع اسکارن‌ها به‌تنهایی با ترکیب کلینوپیروکسن و گارنت موجود در آن‌ها مشخص نمی‌شوند، اما ترکیب هر دوی آن‌ها می‌تواند به‌عنوان راهنمای مناسب و تقریبا یگانه‌ای در تعیین محیط تشکیل مورد استفاده قرار گیرد [۸- ۱۲]. اینودی

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۲۲۰۹۲۹۵۶ ، نمابر: ۸۸۰۲۱۶۷۴-۰۲۱، پست الکترونیکی: zoalaminia@gmail.com

[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.69]

و همکارش [۷] تغییر ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن‌ها در ذخایر اسکارنی را متناسب با تغییرات در نوع کانسارسازی اسکارن (فلز غالب) می‌دانند. آنها ذخایر اسکارنی را به ۵ گروه کانسارهای مس، آهن، سرب- روی، تنگستن و قلع تقسیم نموده‌اند. هم‌چنین مینرت [۴] وابستگی ترکیب شیمیایی کانی‌های اصلی سازنده اسکارن و نوع کانی‌زایی در آن را بیان نموده است، که بر این اساس می‌توان گفت که ترکیب گارنت در اسکارن مس، از نوع آندرادیت، در اسکارن قلع از نوع گروسولر- آندرادیت- آلماندن، در اسکارن تنگستن از نوع اسپسارتین، در اسکارن سرب- روی و اسکارن طلا از نوع محلول جامد گروسولر- آندرادیت و در اسکارن آهن و مولیبدن گارنت از نوع آندرادیت است.

گارنت و کلینوپیروکسن کانی‌های غالب در اسکارن‌ها و نخستین برآورده‌های برهمکنش سیال-سنگ هستند [۷]. ازاین‌رو، زمین‌شیمی این کانی‌ها به عنوان شاخصی از پتانسیل برهم‌کنش پیچیده بین این متغیرها در سرتاسر سیستم اسکارنی است.

هدف از این پژوهش بررسی بافتی، سنگ نگاری و زمین-شیمی گارنت‌ها و کلینوپیروکسن‌های موجود در اسکارن سرانجیک قروه به‌منظور شناخت بهتری از محیط تشکیل اسکارن است. افزون بر این گارنت نیمه‌کلسیمی در اسکارن شیلیت‌دار سرانجیک قروه نیز مورد توجه قرار گرفته است.

روش بررسی

در بررسی‌های صحرایی در مسیرهای گوناگون ۲۷۱ نمونه به صورت منظم از توده نفوذی تا سنگ دیواره برداشت شد. در این پژوهش، نخست مقاطع نازک از نظر سنگ‌شناسی و کانی-شناسی بررسی شدند و سپس تجزیه کمی عناصر اصلی در ۱۶ مقطع نازک-صیقلی از انواع بلورهای گارنت و کلینوپیروکسن توسط میکروسکوپ ریزکاونده‌ی الکترونی مدل Cameca-SX100 در مرکز پژوهشی دانشگاه رم ایتالیا انجام شد. ولتاژ و جریان مورد استفاده برای این تجزیه به ترتیب برابر با ۱۲kV و ۱۰nA بوده است. برنامه تابع R [۱۳] و برنامه Winpyrox [۱۴] نیز به‌ترتیب جهت پردازش نتایج تجزیه‌های گارنت و پیروکسن به منظور برآورد مقدار آهن سه ظرفیتی و دو ظرفیتی و سازای اعضای انتهایی گارنت و کلینوپیروکسن استفاده شد.

بحث و بررسی

زمین‌شناسی منطقه

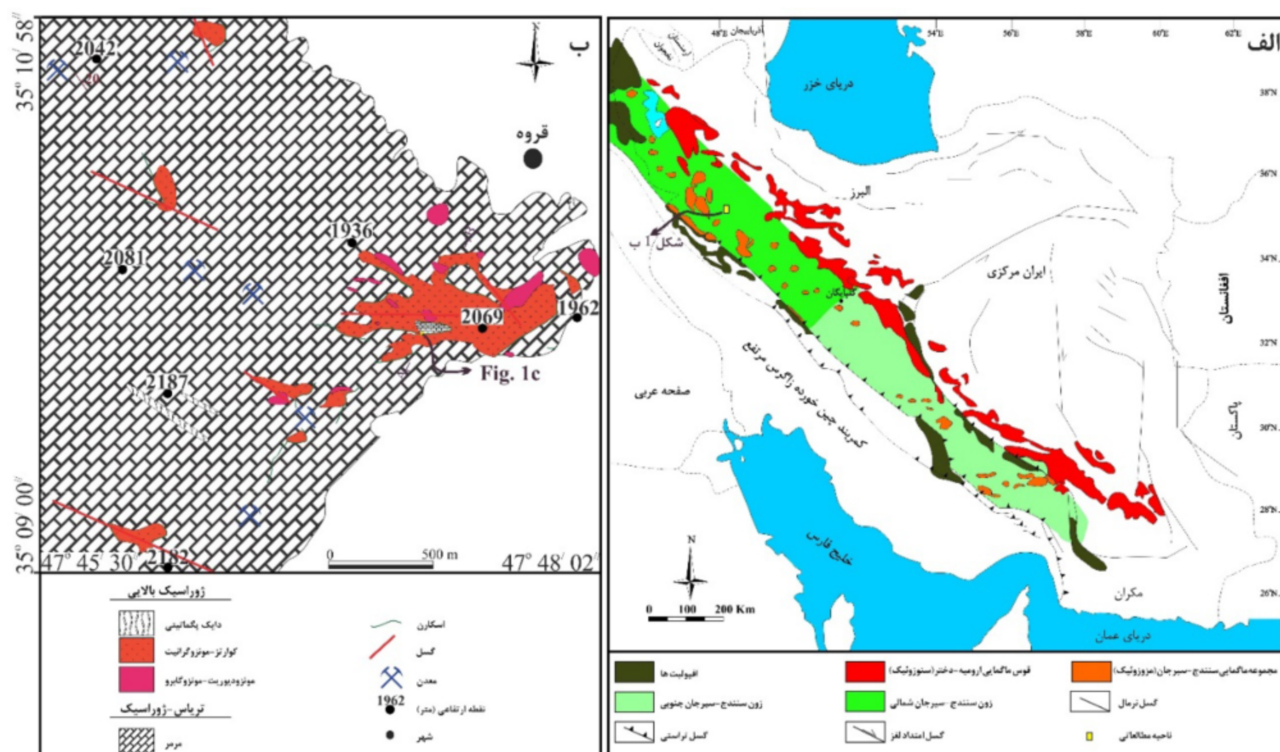
اسکارن سرانجیک قروه در شرق استان کردستان و در گستره جغرافیایی 47^o ۴۵′ ۰۷″ تا 47^o ۵۰′ ۱۱″ طول شرقی و 35^o ۰۸′ ۰۱″ تا 35^o ۱۳′ ۱۴″ عرض شمالی قرار دارد. این منطقه در بخش شمالی پهنه سنندج- سیرجان واقع است. در این بخش، توده‌های گرانیتوئیدی در سنگ‌های رسوبی به سن تریاس-ژوراسیک نفوذ کرده است [۱۵] (شکل ۱ الف) و در مناطقی چون ابراهیم عطار، گلالی و میهم سبب اسکارن‌زایی شده است. این سنگ‌ها در زمان‌های گوناگون در اثر انواع دگرگونی‌های ناحیه‌ای، گرمایی و دینامیکی قرار گرفته‌اند [۱۵].

بررسی‌های سن‌سنجی گرانیتوئیدها نشان می‌دهد که بیشتر این توده‌ها وابسته به دوره ژوراسیک پسین (۱۴۵ تا ۱۷۰ میلیون سال پیش) هستند [۱۶-۲۱].

توده نفوذی سرانجیک قروه بیشتر از گرانیت متوسط دانه با بافت دانه‌ای تشکیل شده دربردارنده درونبوم ریزدانه‌ای مافیک بیضوی یا کروی شکل ریزدانه با ترکیبات کوارتز مونزودیوریت و دیوریت است. توده نفوذی در بخش‌هایی که اندازه بلورها کاهش و مقدار فلدسپار افزایش می‌یابد، اغلب توسط لوکوگرانیت، دایک‌های آپلیتی گرانیتی و رگه‌های کوارتز (شکل ۲ الف) به‌سمت مرز اسکارنی قطع می‌شوند.

نفوذ توده سرانجیک در سنگ میزبان سبب دگرگونی مجاورتی با ترکیب مرمر، هورنفلس کلسیتی- سیلیکاتی و اسکارن شده است (شکل ۱ ب). هم‌چنین در سنگ‌های آذرین منطقه سرانجیک قروه طیف گسترده‌ای از دگرسانی دیده می-شود. مهم‌ترین این دگرسانی‌ها، دگرسانی پتاسیمی، کوارتز سریسیتی (فلسی)، رسی و پروپلیتی هستند. اسکارن سرانجیک به‌صورت نوارهای باریک با عرض بین ۰/۳ تا ۳ متر و طول ۱۰۰ متر با راستای شمالی- جنوبی دیده می‌شود. براساس شواهد صحرایی و بررسی‌های میکروسکوپی، اسکارن سرانجیک شامل دو ناحیه درون‌اسکارن و برون‌اسکارن است. ناحیه برون‌اسکارن بسیار گسترده و مهم‌ترین پهنه اسکارن سرانجیک قروه است و پهنه درون اسکارن بسیار محدود است. همبری برون اسکارن با توده نفوذی و مرمر به‌صورت تیز و ناگهانی و کاملاً مشخص است (شکل ۲ ب).

[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.69]



شکل ۱ الف: جایگاه منطقه مورد بررسی در بخش شمالی پهنه سنندج-سیرجان [۱۵، ۱۶] و ب) نقشه زمین‌شناسی منطقه سرانجیک قروه و جایگاه اسکارن‌ها بر آن (برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ قروه با تغییرات [۱۷]).



شکل ۲ الف: دایک آپلیتی در توده گرانیتی و ب) همبری کاملا نمایان و مشخص برون اسکارن با سنگ دیواره مرمری.

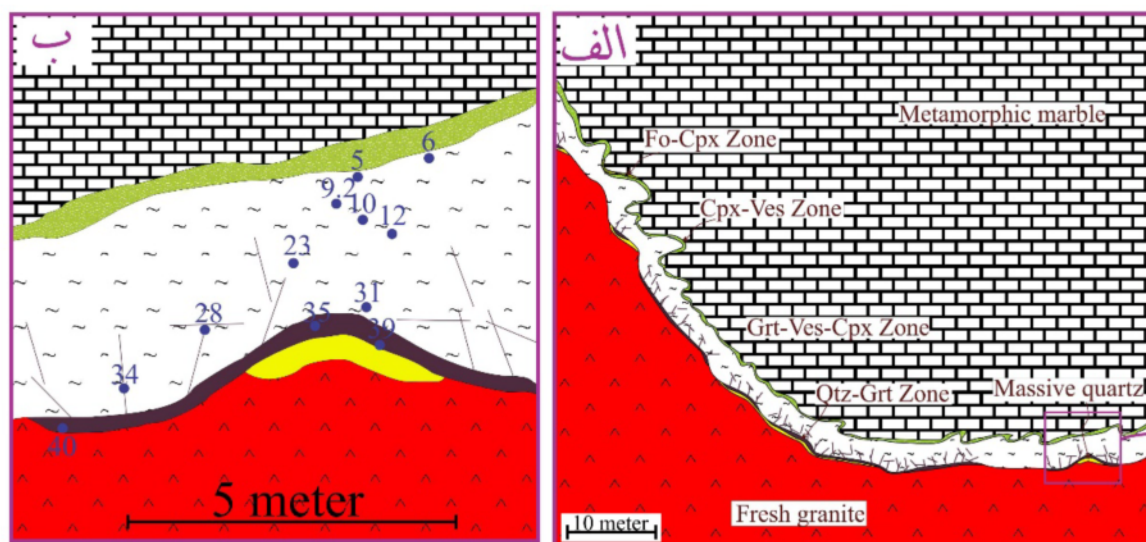
اسکارن سرانجیک قروه با دو مرحله پیشرونده و پسرونده مشخص می‌شود. مرحله پیشرونده شامل کانی‌های بی‌آب و دمای بالا (از جمله کلینوپیروکسن، گارنت، پلاژیوکلاز و شیلیت) و مرحله پسرونده دربردارنده کانی‌های آبدار و یا دمای پایین چون اپیدوت، کلسیت، کوارتز و کلریت است (شکل ۳). با توجه به فراوانی کانی‌ها در بخش‌های گوناگون اسکارن سرانجیک قروه، مدل منطقه‌بندی از توده گرانیتی به سمت جبهه مرمری به‌صورت پهنه‌های کوارتز- گارنت اسکارن، گارنت- وزوویانیت- کلینوپیروکسن اسکارن و کلینوپیروکسن- وزوویانیت اسکارن (شکل ۴ الف) است. افزون بر این، پهنه اسکارن منیزیمی در محل تماس کلینوپیروکسن- وزوویانیت اسکارن و جبهه مرمری که گسترش آن بسیار محدود است و

[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.69]

گاهی در مرزهای مرمر با اسکارن دیده می‌شود (شکل ۴ ب). این پهنه لبه‌ای بیشتر شامل مجموعه کانی‌های پیشرونده (فورستریت و کلینوپیروکسن) است که توسط رگه‌هایی از مجموعه کانی‌های مرحله پسرونده (سرپانتین، تالک و بروسیت) قطع شده است.



شکل ۳ روابط همبری کانی‌ها در اسکارن سرانجیک قروه.

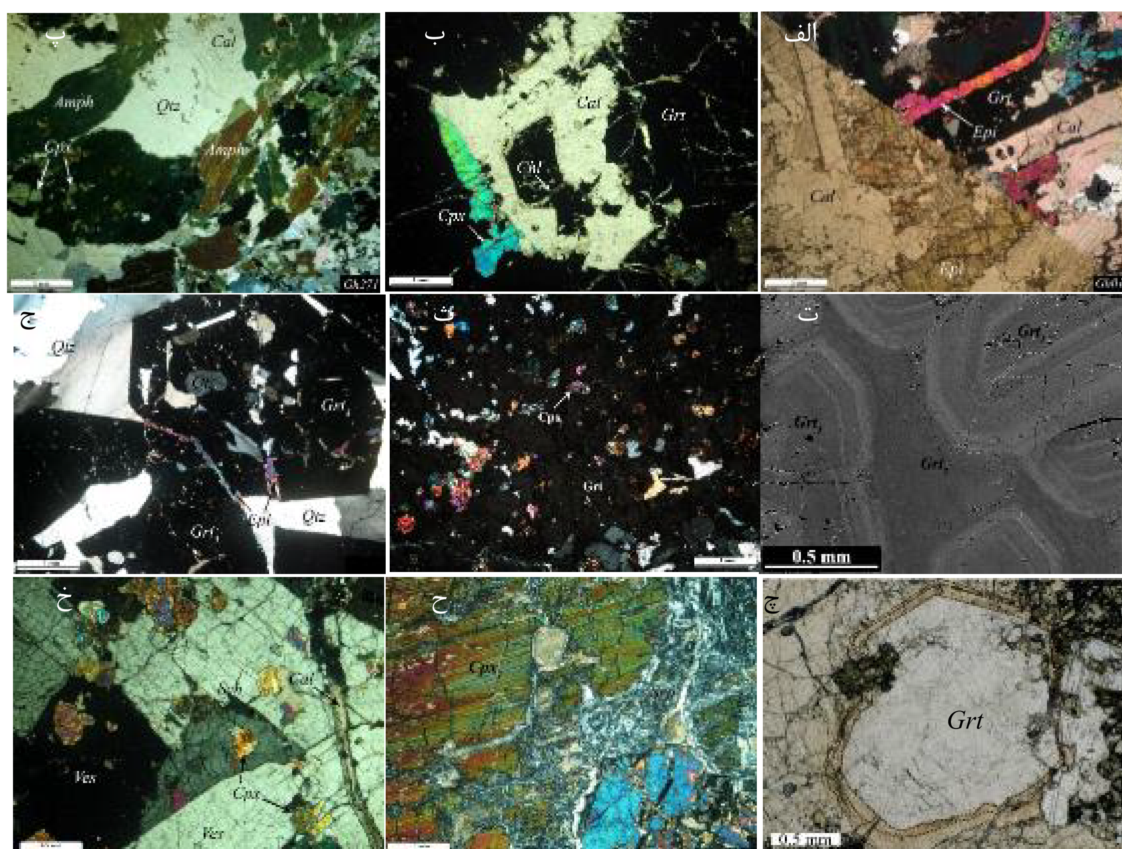


شکل ۴ الف: جایگاه پهنه‌های گوناگون اسکارن سرانجیک قروه نسبت به توده نفوذی و جبهه مرمری. علایم اختصاری: Fo= فورستریت، Cpx= کلینوپیروکسن، Grt= گارنت، Ves= وزوویانیت، Qtz= کوارتز ب) تغییرات ترکیبی گارنت در دو پهنه کوارتز-گارنت و گارنت-وزوویانیت-کلینوپیروکسن. اعداد نشان‌دهنده بیشینه مقدار سازای نیمه‌کلسیمی در گارنت در نقاط گوناگون است. توجه شود که افزایش منظم بیشینه مقدار نیمه‌کلسیمی به‌سمت محل تماس توده گرانیتی دیده می‌شود.

[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.69]

سنگ‌نگاری اسکارن‌ها

براساس بررسی‌های کانی‌شناسی و روابط همبری، دست کم ۳ مرحله اصلی در پیدایش اسکارن سرانجیک قروه تشخیص داده شد عبارتند از: ۱) مرحله دگرگونی هم‌شیمی که این مرحله همزمان با جایگزینی توده نفوذی در سنگ‌های کربناتی تریاس- ژوراسیک آغاز شده است. در این مرحله جریان گرمایی ناشی از توده سبب دگرگونی ایزوشیمیایی سنگ‌های پیرامون و تبدیل آن‌ها به مرمر و هورنفلس شده است. وجود ناخالصی‌های رس و سیلیس در سنگ‌های کربناتی اولیه منجر به تشکیل سیلیکات‌های کلسیمی از جمله دیوپسید و اپیدوت در شرایط ایزوشیمیایی شده است. ۲) مرحله دگرسانی دگرنهادی پیشرونده که شواهد این مرحله از دگرسانی دگرنهادی پیدایش کانی‌های کلسیمی- سیلیکاتی بی‌آب مانند گارنت غنی از گروسولر، گارنت نیمه‌کلسیمیو کلینوپیروکسن نوع دیوپسید- هدنبرژیت است. بافت آن‌ها دانه‌ای و موزائیکی است. بر اساس شواهد سنگ‌نگاری، کانی‌زایی شیلیت در ارتباط با کانی‌های بی‌آب در مرحله پیشرونده انجام شده است. ۳) مرحله دگرسانی مخرب پسرونده که در این مرحله در اثر برهم‌کنش گرماب با مجموعه‌های کلسیمی- سیلیکاتی مرحله پیشرونده، حجم زیادی از فازهای سیلیکاتی (کوارتز)، کلسیمی- سیلیکاتی آبدار (اپیدوت و آمفیبول) همراه با مقادیر بسیار کمی از سولفیدها (پیروتیت، پیریت و کالکوپیریت) پدید آمده‌اند. در اثر این دگرسانی، کانی‌های مرحله پسرونده جانشین کانی‌های مرحله پیشرونده شده و به‌صورت بافت جانشینی دیده می‌شود. از جمله این جانشینی‌ها می‌توان به تبدیل گارنت به اپیدوت، کلسیت و کوارتز (شکل ۵ الف) و نیز جانشینی کلینوپیروکسن با آمفیبول (اکتینولیت-ترمولیت) (شکل ۵ ب) و در مراحل پیشرفته‌تر توسط کلریت، کربنات و اکسید آهن اشاره نمود.



شکل ۵ الف) جانشینی گارنت توسط اپیدوت، کلسیت و کوارتز در مرحله دگرنهادی پسرونده؛ ب) جانشینی کلینوپیروکسن توسط کلریت، کلسیت و اکسید آهن در مرحله دگرنهادی پسرونده، پ) جانشینی کلینوپیروکسن توسط آمفیبول در مرحله دگرنهادی پسرونده، ت) گارنت خودشکل نوع I با بافت دانه ای و گارنت بی‌شکل نوع II با بافت توده‌ای به‌صورت پرکننده فضای بین گارنت‌های نوع I؛ ث: وجود میانبارهای کلینوپیروکسن در گارنتهای نوع II؛ ج) گارنت‌های کاملا خودشکل نوع III در زمینه کوارتز، چ) شکل‌های نامنظم لبه‌های گارنت نوع III و نمایش سیماهای متأثر از فشار بالای فاز سیال در مرحله پیشرونده تأخیری؛ ح) بلورهای کاملا درشت و خودشکل کلینوپیروکسن در پهنه فورستریت-کلینوپیروکسن و جانشینی آن توسط سرپانتین در مرحله دگرنهادی پسرونده و خ) وجود میانبارهای کلینوپیروکسن‌های نوع II در وزوویانیت.

مشاهدات زمینی گارنت‌ها و کلینوپیروکسن‌ها

گارنت: گارنت فراوان‌ترین کانی در اسکارن سرانجیک قروه است (۳ تا ۷۰٪)، ولی با نزدیک شدن به توده نفوذی بر مقدار گارنت‌های شکل‌دار افزوده می‌شود. گارنت‌ها به‌صورت رگه‌ای و یا انبانه‌هایی در مرمر و اسکارن همراه با رگه‌های کوارتز دیده می‌شوند. در بخش‌های نزدیک توده، نسبت گارنت به کلینوپیروکسن به‌مراتب بیشتر است. اغلب گارنت های به‌شدت تجزیه شده در مرحله پسرونده به اپیدوت، کلسیت و کوارتز تبدیل می‌شوند. در برخی موارد، اپیدوت به‌صورت شبه‌ریخت در لبه گارنت‌ها جایگزین می‌شود. با توجه به روابط بافتی در این منطقه دست کم سه نوع گارنت تشخیص داده می‌شود. گارنت نوع I (پیشرونده اولیه) به رنگ قرمز قهوه‌ای- قرمز تیره و بیشتر بی‌شکل و گاهی به‌صورت بلورهای درشت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار است. در برخی موارد، همراه با کوارتز بافت دانه‌ای را تشکیل می‌دهد. برخی از بلورهای شکل‌دار گارنت نوع I هسته‌های ناهمسانگرد شکل‌دار با لبه مشخص هستند که با رورشدی گارنت با درصد مولی بالاتری از آندرادیت دنبال می‌شوند (شکل ۵ پ). گارنت نوع II در نمونه دستی رنگ قرمز روشن و فراوانی کمتری نسبت به گارنت نوع I دارد. گارنت نوع II به‌صورت بلورهای بی‌شکل و یا به‌صورت رورشدی بر گارنت‌های پیشین یا در فضای بین گارنت‌های نوعI تشکیل می‌شود (شکل ۵ ت) و گاهی شامل میانبارهای کلینوپیروکسن و وزوویانیت (شکل ۵ ث) است. گارنت‌های نوع III به‌صورت بلورهای درشت دانه به‌رنگ قرمز روشن- نارنجی به‌صورت پراکنده و همراه با رگه‌های کوارتزی در نزدیکی توده نفوذی قرار دارند (شکل ۵ ج). لبه برخی از گارنت‌ها شکل نامنظمی دارد که به دلیل شوک ناشی از فشار سیال بالا تفسیر می‌شود (شکل ۵ چ) [۲، ۸، ۱۲].

پیروکسن: براساس مجموعه‌های کانیایی و روابط بین آن‌ها، دو نوع کلینوپیروکسن در پهنه های گوناگون اسکارنی شناسایی شد. کلینوپیروکسن نوع I حدود ۱/۵ تا ۲/۵ میلی‌متر، به‌صورت بلورهای منشوری کوتاه نیمه شکل‌دار تا شکل‌دار است. در مرمرها و رگه‌های کلسیتی اندازه بلورهای کلینوپیروکسن بیشتر است و گاهی به ۴ میلیمتر می‌رسد (شکل ۵ ح). این نوع کلینوپیروکسن بیشتر در پهنه فورستریت-کلینوپیروکسن اسکارن و وزوویانیت-کلینوپیروکسن اسکارن دیده می‌شود. با نزدیک شدن به توده نفوذی، کلینوپیروکسن کاهش می‌یابد و اغلب کلینوپیروکسن نوع I در درون گارنت نوع II محبوس می‌شود. کلینوپیروکسن نوع II به صورت بلورهای نیمه شکل-دار تا بی‌شکل و کوچکتر از کلینوپیروکسن نوع I (با اندازه ۰/۴ تا ۱/۵ میلیمتر) است و مقدار آن در پهنه‌های وزوویانیت-کلینوپیروکسن بیشتر و در پهنه گارنت-وزوویانیت-کلینوپیروکسن کمتر است. کلینوپیروکسن نوع II به‌صورت مشخص در ارتباط با گارنت نوع II، شیلیت و وزوویانیت است (شکل ۵ خ).

زمین شیمی گارنت و کلینوپیروکسن

گارنت: نتایج EPMA گارنت در ناحیه‌های گوناگون اسکارن سرانجیک قروه سه گروه کاملا متمایز از بلورهای گارنت را نشان می‌دهد (جدول ۱). تغییرات ترکیبی آن‌ها در نمودار سه تایی گروسولر- آندرادیت و پیرالسپیت (مجموع آلماندین، اسپسارتین و پیروپ) همراه با دیگر اسکارن‌های شیلیت‌دار با شرایط اکسایش مختلف رسم شده است (شکل‌های ۶ الف و ب) [۲۲-۲۸]. به‌طور کلی ترکیب گارنت‌های اسکارن سرانجیک قروه در پهنه‌های مختلف یکسان نیست. مقدار Al گارنت متغیر و مقدار Ca بالاست. گارنت‌هایی با هسته‌های غنی از Al-Ca و لبه‌های غنی از Fe فراوان هستند، اما گارنت‌های یکنواخت و گارنت‌هایی با لبه‌های غنی از Al نیز در برخی موارد دیده می‌شود (جدول ۱). در بیشتر سیستم‌های اسکارنی، گارنت‌های آلومین‌دار غنی از Fe^{+2} و Mn^{+2} در اسکارن تنگستن‌دار دیده می‌شود [۲۹]. به‌طورکلی، گارنت‌های اسکارن سرانجیک قروه فقیر از Fe^{+3} و غنی از Al هستند. کسر مولی پیروپ نیز بسیار پایین و اغلب کمتر از ۰/۵ است.

گارنت نوع I اولیه در گستره ترکیبی گروسولر-آندرادیت با ترکیبی از Grs_{65} And_{25} تا Grs_{45} And_{40} با مقدار پیرالسپیت کمتر از ۱۰درصد مولی مشخص می‌شود. گارنت نوع II (پیشرونده تأخیری) به نسبت یکنواخت و دارای ترکیبی از Grs_{50} And_{25} Pyr_{25} تا Grs_{45} And_{20} Pyr_{35} است و مقدار پیرالسپیت آن بین ۱۰ تا ۲۵ درصد مولی است. گارنت نوع III وابسته به گستره ترکیبی نیمه‌کلسیمی (Grs-Pyr) با ترکیبی از Grs_{70} Pyr_{30} تا Grs_{60} Pyr_{40} است که همراه با مقادیر قابل

[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.69]

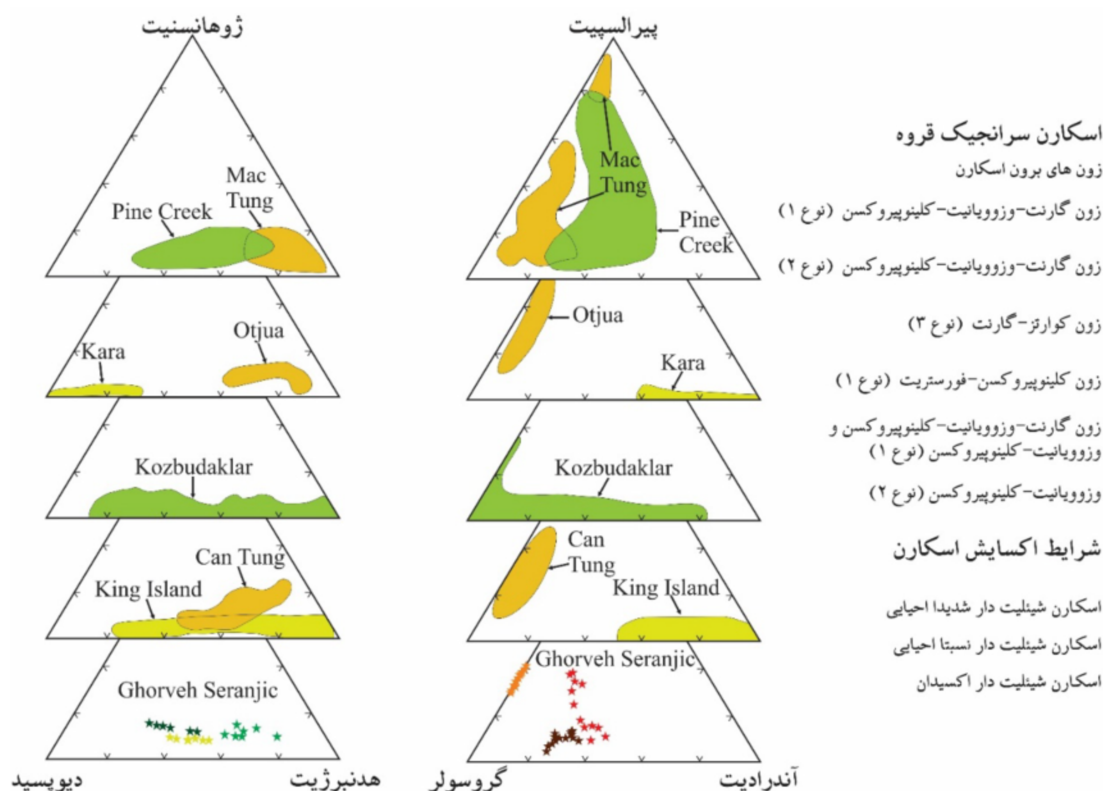
توجهی از آلماندین و اسپسارتین (پیرالسپیت) مشخص می‌شود. در گارنت نوع III، درصد مولی آندرادیت صفر است. این مجموعه از گارنت‌ها اغلب به‌صورت گارنت‌های رگه‌ای قطع کننده گارنت‌های نوع I و II دیده می‌شوند. ترکیب گارنت به‌طور پیوسته درون این رگه‌ها تغییر می‌کند و با دور شدن از توده نفوذی به سمت جبهه مرمری، مقدار آندرادیت و نیز نسبت اسپسارتین به آلماندین افزایش می‌یابد (شکل ۲ ب).

جدول ۱ نتایج تجزیه ریزپردازشی گارنت‌های اسکارن سرانجیک. محاسبه فرمول ساختاری آن‌ها بر اساس ۱۲ اتم اکسیژن.

منطقه	اسکارن گارنت- وزوویانیت-کلینوپیروکسن										اسکارن کوارتز-گارنت								
S. N.	Gh-190	Gh-190	Gh-190	Gh-88	Gh-88	Gh-88	Gh-14	Gh-14	Gh-64	Gh-64	Gh-04	Gh-04	Gh-24	Gh-24	Gh-10	Gh-51	Gh-51	Gh-48	Gh-45
A. N.	1b	1d	1g	1a	1d	1g	2d	2f	1a	1c	1a	1d	1a	1b	2c	1a	1d	1a	1e
نوع	I	I	I	I	I	I	II	II	I	I	III	III	III	III	III	III	III	III	III
درصد وزنی																			
SiO_2	۳۷٫۵۵	۳۷٫۶۱	۳۷٫۰۳	۳۸٫۵۴	۳۷٫۴۷	۳۷٫۶۴	۳۷٫۸۵	۳۷٫۷۰	۳۷٫۵۲	۳۷٫۵۴	۳۹٫۴۵	۳۹٫۵۰	۳۹٫۲۵	۳۹٫۵۱	۳۹٫۱۶	۳۹٫۳۵	۳۸٫۸۵	۳۹٫۴۱	۳۹٫۵۸
TiO_2	۰٫۳۷	۰٫۳۵	۰٫۱۹	۰٫۱۸	۰٫۰۱	۰٫۳۳	۰٫۱۲	۰٫۱۰	۰٫۰۲	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۴
Al_2O_3	۱۵٫۹۸	۱۵٫۳۴	۱۴٫۹۲	۱۶٫۱۲	۱۳٫۳۴	۱۲٫۳۹	۱۶٫۶۸	۱۶٫۸۶	۱۷٫۱۶	۱۶٫۲۸	۲۵٫۲۹	۲۳٫۹۳	۲۴٫۰۶	۲۴٫۰۲	۲۴٫۲۶	۲۴٫۰۱	۲۲٫۷۴	۲۴٫۲۳	۲۲٫۴۶
Cr_2O_3	۰٫۰۱	۰٫۰۸	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۶	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۶	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰٫۱۰	۰٫۰۰	۰٫۱۷
FeO^*	۱۰٫۱۵	۱۰٫۶۸	۱۲٫۴۱	۸٫۸۴	۱۱٫۹۵	۱۳٫۱۴	۱۲٫۲۴	۱۵٫۱۹	۱۲٫۸۳	۱۳٫۱۳	۱۱٫۳۵	۱۳٫۸۷	۱۳٫۴۵	۱۳٫۱۳	۱۲٫۹۹	۱۳٫۰۳	۱۳٫۲۱	۱۳٫۱۴	۱۵٫۴۲
MnO	۳٫۶۱	۳٫۵۶	۴٫۵۲	۲٫۸۶	۲٫۷۲	۳٫۶۵	۶٫۴۱	۶٫۶۵	۱٫۶۶	۱٫۷۱	۰٫۴۵	۱٫۰۶	۰٫۸۰	۱٫۰۱	۰٫۹۷	۱٫۰۲	۱٫۰۵	۱٫۰۲	۱٫۳۱
MgO	۰٫۰۵	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۵	۰٫۰۷	۰٫۱۰	۰٫۱۵	۰٫۰۰	۰٫۰۴	۰٫۱۳	۰٫۰۶	۰٫۰۸	۰٫۰۹	۰٫۰۷	۰٫۰۹	۰٫۰۸	۰٫۰۶	۰٫۱۷
CaO	۳۱٫۸۶	۳۲٫۰۷	۲۹٫۷۴	۳۲٫۵۸	۳۲٫۰۰	۳۰٫۵۸	۲۷٫۰۴	۲۳٫۹۲	۳۰٫۶۳	۳۰٫۹۴	۲۳٫۰۹	۲۰٫۹۶	۲۲٫۰۱	۲۱٫۶۷	۲۱٫۸۳	۲۲٫۱۹	۲۲٫۰۰	۲۲٫۰۴	۲۰٫۴۸
مجموع	۹۹٫۵۸	۹۹٫۷۳	۹۸٫۸۵	۹۹٫۱۷	۹۷٫۴۶	۹۷٫۸۰	۱۰۰٫۵۰	۱۰۰٫۵۷	۹۹٫۸۲	۹۹٫۶۹	۹۹٫۸۱	۹۹٫۴۵	۹۹٫۶۸	۹۹٫۴۹	۹۹٫۳۰	۹۹٫۷۵	۹۹٫۰۲	۹۹٫۹۲	۹۹٫۶۳
کاتیون ها بر پایه ۱۲ اتم اکسیژن																			
Si	۲٫۹۴	۲٫۹۵	۲٫۹۴	۳٫۰۱	۳٫۰۰	۳٫۰۲	۲٫۹۶	۲٫۹۷	۲٫۹۵	۲٫۹۶	۲٫۹۹	۳٫۰۳	۳٫۰۱	۳٫۰۲	۳٫۰۰	۳٫۰۱	۳٫۰۰	۳٫۰۱	۳٫۰۶
Ti	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Al	۱٫۴۷	۱٫۴۲	۱٫۴۰	۱٫۴۸	۱٫۲۵	۱٫۱۷	۱٫۵۴	۱٫۵۶	۱٫۶۱	۱٫۵۴	۲٫۲۶	۲٫۱۶	۲٫۱۷	۲٫۱۷	۲٫۱۹	۲٫۱۶	۲٫۱۶	۲٫۱۸	۲٫۰۴
Cr	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱
Fe^{3+}	۰٫۵۶	۰٫۶۱	۰٫۶۵	۰٫۵۱	۰٫۷۵	۰٫۸۱	۰٫۴۹	۰٫۴۶	۰٫۳۸	۰٫۴۴	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Fe^{2+}	۰٫۱۰	۰٫۰۹	۰٫۱۸	۰٫۰۷	۰٫۰۵	۰٫۰۷	۰٫۳۱	۰٫۵۴	۰٫۴۶	۰٫۴۳	۰٫۷۲	۰٫۸۹	۰٫۸۶	۰٫۸۴	۰٫۸۳	۰٫۸۳	۰٫۸۵	۰٫۸۴	۱٫۰۰
Mn	۰٫۲۴	۰٫۲۴	۰٫۳۰	۰٫۱۹	۰٫۱۸	۰٫۲۵	۰٫۴۲	۰٫۴۴	۰٫۱۱	۰٫۱۱	۰٫۰۳	۰٫۰۷	۰٫۰۵	۰٫۰۷	۰٫۰۶	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۹
Mg	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲
Ca	۲٫۶۷	۲٫۶۹	۲٫۵۳	۲٫۷۲	۲٫۷۵	۲٫۶۳	۲٫۲۷	۲٫۰۲	۲٫۵۸	۲٫۶۱	۱٫۸۷	۱٫۷۲	۱٫۸۱	۱٫۷۸	۱٫۷۹	۱٫۸۲	۱٫۸۲	۱٫۸۰	۱٫۷۰
مجموع	۸٫۰۲	۸٫۰۲	۸٫۰۲	۷٫۹۹	۸٫۰۰	۷٫۹۷	۸٫۰۱	۸٫۰۱	۸٫۰۹	۸٫۰۹	۷٫۸۸	۷٫۸۹	۷٫۹۱	۷٫۸۹	۷٫۹۰	۷٫۹۱	۷٫۹۲	۷٫۹۰	۷٫۹۱
Grs	۶۰٫۵۶	۵۸٫۳۹	۵۲٫۳۶	۶۵٫۶۸	۵۴٫۳۱	۴۷٫۸۰	۵۱٫۰۷	۴۴٫۱۳	۶۷٫۹۲	۶۶٫۸۴	۷۰٫۹۴	۶۳٫۸۹	۶۶٫۱۴	۶۵٫۸۶	۶۶٫۴۵	۶۶٫۵۴	۶۵٫۸۳	۶۶٫۴۰	۶۰٫۰۷
And	۲۸٫۵۵	۳۱٫۰۴	۳۲٫۷۸	۲۵٫۴۷	۳۷٫۴۷	۴۱٫۱۱	۲۴٫۷۵	۳۳٫۴۲	۱۹٫۵۴	۲۲٫۴۶	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Pyr	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۱۲	۰٫۲۰	۰٫۲۸	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۱۶	۰٫۵۳	۰٫۲۵	۰٫۳۴	۰٫۳۹	۰٫۲۹	۰٫۳۹	۰٫۳۳	۰٫۳۴	۰٫۷۰
Alm	۱٫۶۸	۱٫۳۱	۳٫۹۸	۲٫۳۴	۱٫۷۹	۲٫۴۲	۹٫۳۳	۱۸٫۰۲	۸٫۷۹	۶٫۶۳	۲۷٫۲۸	۳۳٫۱۰	۳۱٫۵۸	۱۳٫۳۰	۳۰٫۸۹	۳۰٫۵۵	۳۱٫۰۱	۳۰٫۹۲	۳۵٫۶۱
Sps	۸٫۰۸	۷٫۹۶	۱۰٫۳۰	۶٫۳۳	۶٫۱۷	۸٫۳۹	۱۴٫۳۱	۱۴٫۱۴	۳٫۷۵	۳٫۹۰	۱٫۱۰	۲٫۵۶	۱٫۹۰	۲٫۴۳	۲٫۳۲	۲٫۴۱	۲٫۴۹	۲٫۹۳	۳٫۰۸

تذکر: FeO^* = مجموع کل آهن‌ها، Grs= گروسولر، And= آندرادیت، Pyr= پیروپ، Alm= آلماندین، SPs= اسپسارتین، .S.N= شماره نمونه، .A.N= شماره نقطه تجزیه شده.

[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.69]



شکل ۶ نمودار سه‌تایی توزیع ترکیب تجزیه‌های نقطه‌ای کمی گارنت (الف) و کلینوپیروکسن (پ) در ناحیه سرانجیک قروه و مقایسه آن با اسکارن‌های تنگستن احیایی و اکسایشی جهان (ب و ت) [۲۲- ۲۸].

نسبت گارنت نیمه کلسیمی (نوع II و III) به گارنت گراندیتی (نوع I) با دورشدن از توده نفوذی به‌سمت جبهه مرمری کاهش می‌یابد و این کاهش با کاهش بسیار کوارتز در پهنه‌های اسکارنی همراه است (شکل‌های ۲ الف و ب).

کلینوپیروکسن: تجزیه EPMA کلینوپیروکسن از پهنه‌های گوناگون اسکارن سرانجیک قروه دو گروه ترکیبی سالیتی و فروسالیتی را نشان می‌دهد (جدول ۲). به‌طور کلی، بلورهای کلینوپیروکسن اسکارن سرانجیک قروه منطقه‌بندی نداشته و تقریبا ترکیب یکسانی دارند، اما ترکیب کلینوپیروکسن‌ها در پهنه‌های گوناگون متفاوت است (شکل ۶ پ). در کلینوپیروکسن‌های اسکارن سرانجیک قروه مقدار Fe/Fe+Mn بسیار پایین و مقدار Cr_2O_3، TiO_2 و Na_2O کم است. مقدار کم Cr، Ti و Na (جدول ۲) نشان‌دهنده خاستگاه دگرگونی است (شکل ۷) [۳۰]. کلینوپیروکسن‌های نوع I (اولیه) با ترکیب فروسالیتی (Hd_{58-75} Di_{27-16} Jo_{8-13}) در پهنه درون اسکارن و با ترکیب سالیتی (Hd_{27-40} Di_{58-51} Jo_{8-14}) در پهنه فورستریت-کلینوپیروکسن اسکارن دیده می‌شود. نسبت Mn/Fe در این کلینوپیروکسن‌ها ۰٫۰۹ تا ۰٫۲ است که مقدار متوسطی را بر اساس رده بندی ناکانو [۳۱، ۳۲] نشان می دهد و با دیگر نهشته‌های اسکارنی شیلیت‌دار همخوانی کامل دارد (شکل ۶ ت). از طرف دیگر، کلینوپیروکسن نوع II (تاخیری) ترکیب حدواسطی بین سالیت و فروسالیت (Hd_{36-48} Di_{43-51} Jo_{7-12}) با نسبت ژوهانسنیت نسبتاً بیشتری دارد. به‌علت افزایش Mn، نسبت Mn/Fe در گستره وسیعی از ۰٫۰۲ تا ۰٫۳۲ تغییر می‌کند. غنی‌شدگی Mn در کلینوپیروکسن‌های نسل دوم فرایندی معمول در مرحله پیشرونده اسکارن‌های تنگستن‌دار است [۲۳].

شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل اسکارن پیشرونده

براساس بررسی‌های صورت گرفته در این ناحیه، اسکارن سرانجیک در عمق ۵ تا ۶ کیلومتری و فشار تقریباً ۱٫۵ تا ۲ کیلوبار تشکیل شده است [۳۳]. مشاهدات صحرایی از قبیل عدم شکستگی‌های برشی و شکننده در ارتباط با کانی‌زایی، گسترش وسیع هورنفلس‌های آهکی‌سیلیکاتی و مرزهای نفوذی نیمه موازی با لایه‌بندی نیز تایید کننده محیط به نسبت عمیق است [۶]. حضور کانی‌های بی‌آب اولیه چون کلینوپیروکسن و گارنت در اسکارن‌های پیشرونده اولیه می تواند گستره بالای

[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.69]

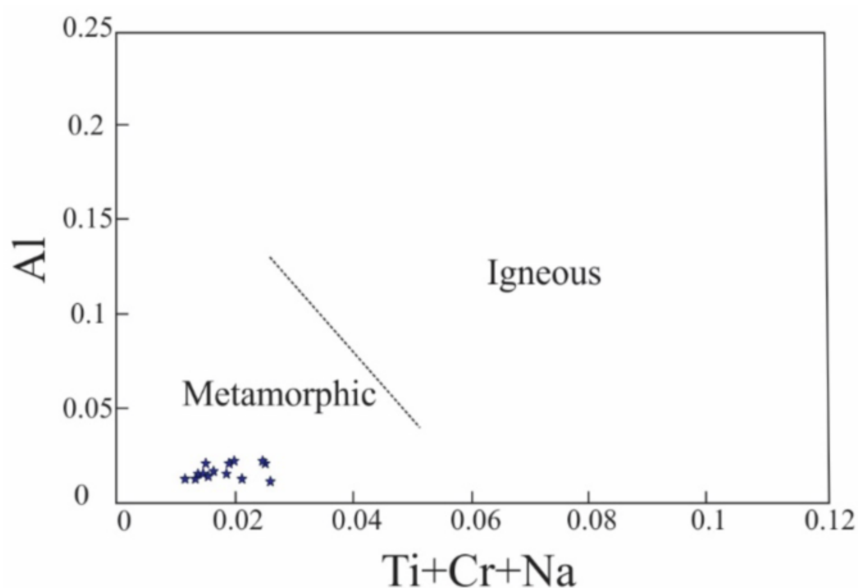
دما و XCO_2 را در زمان تشکیل اسکارن سرانجیک قروه مشخص کند [۳۴، ۳۵]. در بیشتر اسکارن‌های دنیا، XCO_2 از ۰٫۲ تا ۰٫۰۵ متغیر است [۲۹]. در اسکارن سرانجیک قروه XCO_2 کمتر از ۰٫۱ است که به‌دلیل نبود ولاستونیت در مجموعه کانی‌های اسکارنی آن است [۳۶].

مجموعه گارنت گروسولری با ترکیب Grs_{80-90} و همزیست با کلینوپیروکسن اولیه در نبود ولاستونیت نشان می‌دهد که اسکارن پیشرونده در دمای ۵۳۰°C تا ۵۸۰°C از سیال‌هایی با XCO_2 تقریباً ۰٫۱ – ۰٫۲ تشکیل شده است (شکل ۸) [۳۷-۳۹]. نبود ولاستونیت و حضور وزوویانیت در مجموعه‌های کانیایی نشان دهنده مقدار XCO_2 در حدود ۰٫۱ و یا کمتر است [۴۰]. با این وجود، دابسون [۴۱] پیشنهاد می‌کند که XCO_2 نسبتاً بالا ممکن است مانع تشکیل ولاستونیت شود و از طرفی، فراوانی فلوئور در فاز سیال مقدار وزوویانیت را افزایش داده و به‌شدت از نسبت کلینوپیروکسن کاسته و سبب شده است که وزوویانیت در XCO_2 بالاتری پایدار بماند. در چنین شرایطی، کمترین گستره دمایی در اسکارن پیشرونده مورد بررسی ۴۰۰°C تا ۴۵۰°C و XCO_2 حدود ۰٫۰۱۵ تا ۰٫۰۲ است. مرحله پسرونده با مجموعه کانی‌های اسکارنی آب‌دار از جمله اپیدوت، آمفیبول کلسیم‌دار و کلریت مشخص می‌شود که اپیدوت شامل ۲۰ تا ۳۰ درصد مولی پیستاسیت $(Fe^{+3}/Fe^{+3}+Al^{VI})$ است.

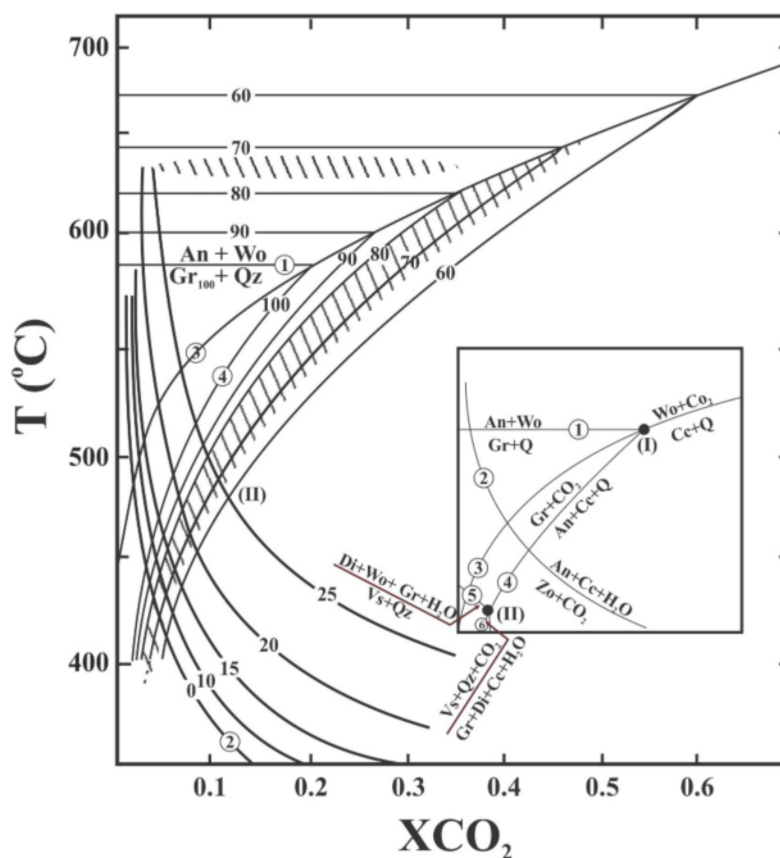
جدول ۲ نتایج تجزیه ریزپردازشی کلینوپیروکسن‌های اسکارن سرانجیک. محاسبه فرمول ساختاری آن‌ها بر اساس ۶ اتم اکسیژن.

منطقه	اسکارن وزوویانیت-کلینوپیروکسن								اسکارن گارنت-وزوویانیت-کلینوپیروکسن						درون اسکارن	
S. N.	Gh271	Gh271	Gh148	Gh148	Gh08	Gh08	Gh244	Gh244	Gh190	Gh190	Gh04	Gh04	Gh14	Gh14	Gh63	Gh63
A. N.	1a	1b	1a	1c	2b	2c	1a	1b	1a	1b	1a	1c	1a	1b	1a	1c
نوع	I	I	I	I	I	I	I	I	II	II	II	II	II	II	I	I
Weight percentage																
SiO_2	۴۸٫۷۵	۴۸٫۵۹	۴۹٫۰۵	۴۹٫۰۲	۵۱٫۳۴	۵۱٫۰۶	۵۱٫۰۸	۵۱٫۶۱	۴۹٫۹۸	۵۱٫۵۶	۵۰٫۵۳	۵۰٫۵۸	۵۱٫۵۲	۵۱٫۶۰	۴۸٫۹۸	۴۹٫۲۰
TiO_2	۰٫۰۴	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۵	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۴	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۰
Al_2O_3	۰٫۴۴	۰٫۴۶	۰٫۴۴	۰٫۴۷	۰٫۲۸	۰٫۳۴	۰٫۳۷	۰٫۳۴	۰٫۵۱	۰٫۴۹	۰٫۴۷	۰٫۳۰	۰٫۳۱	۰٫۲۷	۰٫۴۲	۰٫۳۱
Cr_2O_3	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۴	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۳	۰٫۰۰
FeO^*	۲۰٫۳۳	۲۰٫۳۴	۲۰٫۳۲	۲۰٫۵۷	۱۱٫۰۱	۱۰٫۹۷	۱۴٫۹۶	۱۲٫۶۳	۱۳٫۶۶	۱۴٫۰۱	۱۲٫۹۵	۱۲٫۹۵	۱۱٫۷۶	۱۱٫۱۹	۲۳٫۳۳	۲۲٫۷۷
MnO	۳٫۱۲	۲٫۶۶	۲٫۷۸	۲٫۳۷	۰٫۹۷	۰٫۸۹	۰٫۶۹	۲٫۶۹	۲٫۳۷	۲٫۲۲	۲٫۰۹	۲٫۴۳	۲٫۲۰	۲٫۱۱	۱٫۴۳	۰٫۹۰
MgO	۴٫۵۶	۴٫۶۶	۴٫۵۹	۴٫۷۴	۱۰٫۶۷	۱۰٫۱۸	۷٫۷۳	۹٫۲۴	۸٫۵۴	۸٫۱۷	۹٫۰۱	۹٫۲۱	۹٫۸۴	۱۰٫۴۳	۳٫۰۰	۳٫۷۶
CaO	۲۲٫۲۴	۲۲٫۱۰	۲۲٫۰۶	۲۱٫۹۲	۲۴٫۶۳	۲۴٫۲۱	۲۲٫۸۸	۲۳٫۴۹	۲۳٫۷۵	۲۳٫۳۰	۲۳٫۶۱	۲۳٫۷۵	۲۴٫۱۰	۲۴٫۶۱	۲۳٫۱۸	۲۲٫۸۸
Na_2O	۰٫۱۷	۰٫۳۱	۰٫۲۴	۰٫۲۳	۰٫۱۵	۰٫۲۴	۰٫۱۷	۰٫۱۹	۰٫۲۴	۰٫۳۳	۰٫۲۷	۰٫۱۹	۰٫۰۰	۰٫۰۳	۰٫۲۷	۰٫۳۰
K_2O	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۱۱	۰٫۱۳	۰٫۰۰	۰٫۰۰
مجموع	۹۹٫۹۵	۹۹٫۴۹	۹۹٫۷۱	۹۹٫۵۸	۹۹٫۲۷	۹۸٫۰۱	۹۹٫۹۷	۱۰۰٫۳۲	۹۹٫۰۵	۱۰۰٫۰۸	۹۹٫۰۰	۹۹٫۴۴	۹۹٫۸۶	۱۰۰٫۳۶	۱۰۰٫۶۴	۱۰۰٫۱۱
تعداد یون ها برسلس ۶اتم اکسیژن و محاسبه هنجاری عضو انتهایی پلینوپیروکسن																
Si	۱٫۹۵	۱٫۹۵	۱٫۹۶	۱٫۹۶	۱٫۹۷	۱٫۹۸	۱٫۹۹	۱٫۹۸	۱٫۹۶	۲٫۰۰	۱٫۹۷	۱٫۹۷	۱٫۹۸	۱٫۹۷	۱٫۹۷	۱٫۹۷
Ti	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Al	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱
Cr	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Fe3+	۰٫۰۹	۰٫۱۰	۰٫۰۷	۰٫۰۶	۰٫۰۶	۰٫۰۴	۰٫۰۱	۰٫۰۴	۰٫۱۰	۰٫۰۲	۰٫۰۷	۰٫۰۹	۰٫۰۴	۰٫۰۷	۰٫۰۸	۰٫۰۸
Fe2+	۰٫۵۹	۰٫۵۸	۰٫۶۱	۰٫۶۲	۰٫۲۹	۰٫۳۲	۰٫۴۷	۰٫۳۷	۰٫۳۵	۰٫۴۳	۰٫۳۵	۰٫۳۳	۰٫۳۳	۰٫۲۸	۰٫۷۰	۰٫۶۹
Mn	۰٫۱۱	۰٫۰۹	۰٫۰۹	۰٫۰۸	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۹	۰٫۰۹	۰٫۰۸	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۸	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۵	۰٫۰۳
Mg	۰٫۲۷	۰٫۲۸	۰٫۲۷	۰٫۲۸	۰٫۶۱	۰٫۵۹	۰٫۴۵	۰٫۵۳	۰٫۵۰	۰٫۴۷	۰٫۵۳	۰٫۵۴	۰٫۵۷	۰٫۶۰	۰٫۱۸	۰٫۲۲
Ca	۰٫۹۵	۰٫۹۵	۰٫۹۵	۰٫۹۴	۱٫۰۱	۱٫۱۰	۰٫۹۵	۰٫۹۷	۱٫۰۰	۰٫۹۷	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۰٫۹۸
Na	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۲
K	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰
مجموع	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۳	۴٫۰۱	۴٫۰۲	۴٫۰۳	۴٫۰۱	۴٫۰۲	۴٫۰۲	۴٫۰۰
$Fe^{+2}/(Mg+Fe^{+2})$	۰٫۶۹	۰٫۶۸	۰٫۶۹	۰٫۶۹	۰٫۳۲	۰٫۳۵	۰٫۵۱	۰٫۴۱	۰٫۴۱	۰٫۴۸	۰٫۴۰	۰٫۳۸	۰٫۳۷	۰٫۳۲	۰٫۷۹	۰٫۷۵
Mn/Fe	۰٫۱۸	۰٫۱۶	۰٫۱۵	۰٫۱۳	۰٫۱۱	۰٫۰۹	۰٫۱۹	۰٫۲۴	۰٫۲۳	۰٫۱۶	۰٫۲۰	۰٫۲۴	۰٫۲۱	۰٫۲۵	۰٫۰۷	۰٫۰۴
Di	۲۷٫۱۸	۲۸٫۰۲	۲۷٫۲۱	۲۷٫۸۷	۵۷٫۹۹	۵۵٫۹۱	۴۳٫۴۶	۵۱٫۵۱	۴۴٫۹۴	۴۳٫۶۷	۴۷٫۶۵	۴۸٫۰۲	۵۱٫۱۲	۵۳٫۳۵	۱۶٫۳۱	۲۱٫۵۶
Hd	۵۹٫۳۸	۵۸٫۳۴	۶۰٫۶۸	۶۱٫۴۱	۲۷٫۶۷	۳۰٫۴۰	۴۵٫۸۴	۶۳٫۱۲	۴۷٫۰۶	۴۸٫۶۵	۴۴٫۴۶	۴۴٫۸۰	۴۰٫۷۲	۳۸٫۰۲	۷۵٫۰۲	۶۵٫۹۸
Jo	۱۳٫۴۵	۱۳٫۶۳	۱۲٫۱۱	۱۰٫۷۵	۱۴٫۳۴	۱۳٫۷۰	۱۰٫۷۰	۱۲٫۳۷	۸٫۰۰	۷٫۶۷	۷٫۸۹	۷٫۱۸	۸٫۱۶	۸٫۶۴	۸٫۶۷	۱۲٫۴۶
FeO^* = مجموع کل آهن‌ها، Di= دیوپسید، Hd= هدنبرژیت، Jo= ژوهانسنیت، .S.N= شماره نمونه، .A.N= شماره نقطه تجزیه شده.																

[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.69]

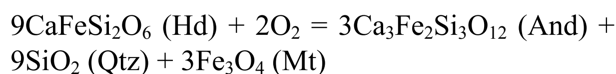


شکل ۷ نمودار Al نسبت به (Ti+Cr+Na) که نشان‌دهنده خاستگاه دگرگونی بلورهای کلینوپیروکسن اسکارن سرانجیک قروه است [۳۰].



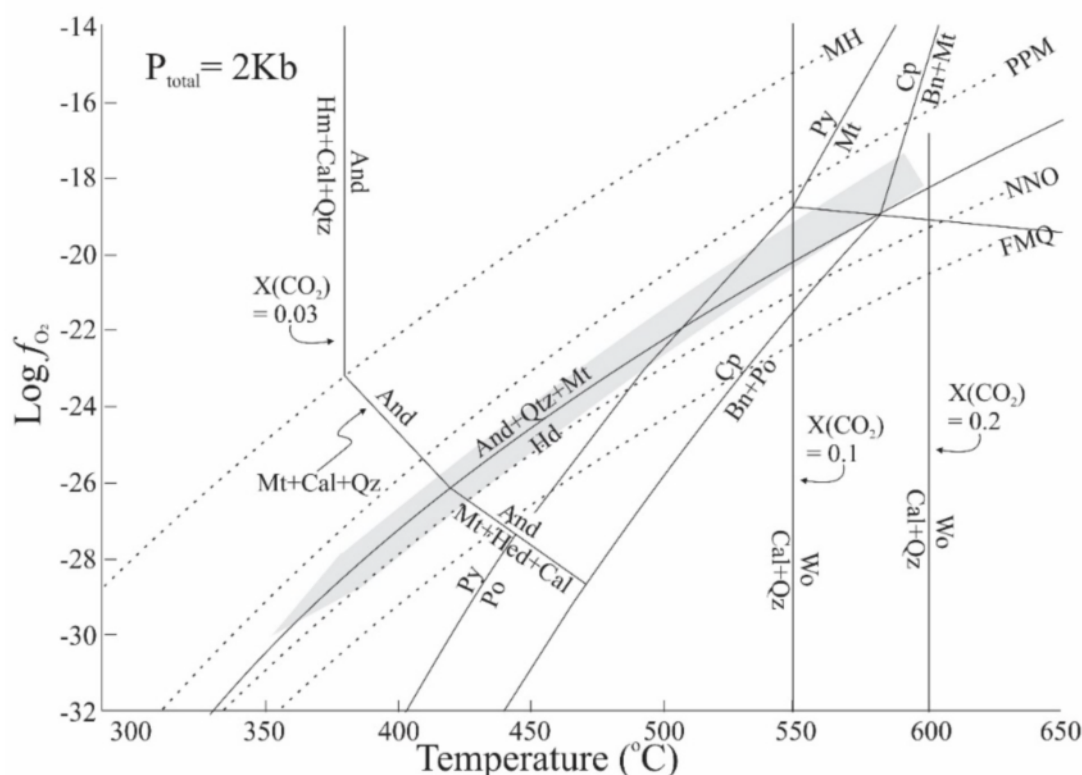
شکل ۸ نمودار T-XCO_2 در فشار ۲ کیلوبار که نشان‌دهنده محیط کلی دگرگونی اسکارن در مرحله دگرنهادی پیشرونده در ناحیه سرانجیک قروه است. اعداد روی واکنش (۲) نشان‌دهنده درصد مولی پیستازیت در اپیدوت است، در حالی‌که اعداد در واکنش‌های (۱) و (۴) نشان‌دهنده درصد مولی گروسولر در گارنت گراندیتی است [۳۷-۳۹]. بخش هاشور زده نشان‌دهنده مراحل دگرگونی اسکارن سرانجیک است. (علایم اختصاری: An=آنورتیت؛ Cc=کلسیت؛ Gr=گروسولر؛ Q= کوارتز؛ Wo= ولاستونیت؛ Zo= زوئیزیت؛ Di= دیوپسید؛ Vs=وزوویانیت).

مجموعــه گارنــت گرانــدیتی-نیمــه‌کــسیمی بــه‌همــراه کلینوپیروکسن سالیتی- فروسالیتی می‌تواند شرایط گریزنـدگی اکسیژن را در زمـان تـشکیل اسـکارن پیـشرونده تعیـین کنـد. درصد مولی آلماندین گارنت‌های گراندیتی با افزایش جانـشینی Al توسط Fe^{+3} افزایش می‌یابد [۷]. افـزایش نـسبت آلمانـدین به اسپسارتین به‌سمت توده نفوذی می‌تواند سـبب افزایـشی در فعالیـت Fe^{+2} و کـاهش گریزنـدگی اکـسیژن طـی دگرگـونی اسکارن شود. این گریزندگی اکـسیژن بـه نـسبت پـایین بـرای جانشینی Fe^{+2} و Mn در گارنـت‌هـای گروسـولری مربـوط بـه نهشته‌های شیلیت‌دار است [۴۲]. مقـادیر نـاچیز مگنتیـت بـه-همراه گارنت گراندیتی و کلینوپیروکسن سالیتی و نسبت بـالای پیروتیت به پیریت شرایط گریزندگی اکسیژن پایین‌تری از بـافر پیروتیت- پیریت- مگنتیت را نشان می‌دهـد. از طرفـی، حـضور گسترده گارنت‌های گروسـولری- نیمـه‌کلـسیمی بـه‌همـراه کلینوپیروکسن در مجموعه اسکارن پیـشرونده بـا واکـنش زیـر مشخص می‌شود [۴۳]:



$$9CaFeSi_2O_6\ (Hd) + 2O_2 = 3Ca_3Fe_2Si_3O_{12}\ (And) + 9SiO_2\ (Qtz) + 3Fe_3O_4\ (Mt)$$

این واکنش حـد بـالای گریزنـدگی اکـسیژن را بـرای مجموعـه اسکارن پیشرونده نشان می‌دهـد (شـکل ۹) [۴۴-۴۷]. حـضور گارنت گرانـدیتی بـا مقـادیر زیـادی از آلمانـدین مـی‌توانـد در راستای بافر نیکل- اکسید نیکل یا زیر آن تـشکیل شـده باشـد [۴۷]. افزون بر آن، نبود گرافیت در مجموعه اسکارن سرانجیک قروه گستره کمتری از گریزنـدگی اکـسیژن را فـراهم مـی‌کنـد. نمودار شکل ۹ نشان می‌دهد که اسکارن‌های پیشرونده در دما-های ۵۷۰ تا ۴۵۰ درجه سانتیگراد و گریزندگی اکسیژن ۱۸- تا ۳۰- تشکیل شده است.



شکل ۹ نمودار دما و گریزندگی اکسیژن در فشار ۲ کیلوبار که نشان‌دهنده محیط تشکیل اسکارن سرانجیک پیشرونده (ناحیه خاکستری) است (برگرفته از مرجع [۴۴] با تغییرات و واکنش‌ها از مراجع [۴۵-۴۷] هستند) علایم اختصاری: MH=بافر مگنتیت–هماتیت؛ PPM=بافر پیریت–پیروتیت=مگنتیت؛ NNO=بافر نیکل=اکسید نیکل؛ FMQ=بافر فایالیت–مگنتیت–کوارتز؛ PY=پیریت؛ PO=پیروتیت؛ Mt=مگنتیت؛ Cp= کالکوپیریت؛ Bn =بورنیت؛ Qz =کوارتز؛ Cal= کلسیت؛ Wo= ولاستونیت؛ And= آندرادیت؛ Hm= هماتیت.

[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.69]

برداشت

نفوذ توده گرانیتوئیدی سرانجیک قروه به سن ژوراسیک پسین به‌درون سنگ‌های کربناتی، به سن تریاس- ژوراسیک، منجر به اسکارن‌زایی در منطقه شده است. بر اساس بررسی‌های کانی‌شناسی، اسکارن سرانجیک قروه به‌صورت اسکارن کلسیمی-منیزیمی است. اسکارن منیزیمی با گسترش بسیار محدود در پهنه حاشیه‌ای اسکارن با مجموعه کانی‌های فورستریت (بیشتر)، طلق، سرپانتین و بروسیت مشخص می‌شود. اسکارن کلسیمی با مجموعه کانی‌های گارنت، کلینوپیروکسن، وزوویانیت، آمفیبول و اپیدوت شامل دو پهنه درون اسکارن و برون اسکارن است. مجموعه کانی‌های برون اسکارن نشان‌دهنده دو مرحله پیشرونده و پسرونده است. مرحله پیشرونده با کانی‌های کلینوپیروکسن و گارنت مشخص می‌شود. شواهد بافتی و تجزیه شیمیایی کانی‌های گارنت و کلینوپیروکسن نشان‌دهنده وجود دو نوع کلینوپیروکسن و سه نوع گارنت است. با توجه به ویژگی‌های زمین‌شیمیایی کلینوپیروکسن، نخست کلینوپیروکسن‌های سالیتی در لبه‌های اسکارن به‌همراه فورستریت تشکیل می‌شود. سپس در گام بعدی با ورود Fe به سیستم اسکارنی، فعالیت Fe^{+2} افزایش یافته که کاهش فعالیت Mg را در محیط به‌دنبال داشته است و سبب تشکیل کلینوپیروکسن فروسالیتی شده است. این افزایش فعالیت Fe^{+2} متناسب با کاهش گریزندگی اکسیژن طی دگرگونی اسکارن است. ترکیب شیمیایی انواع گارنت‌های سرانجیک قروه نشان می‌دهد که ترکیب گارنت تابع ساده‌ای از فاصله نسبت به توده نفوذی نیست، اما دست کم می‌تواند بازتابی از مسیرهای جریان سیال باشد. از این‌رو، ترکیب گارنت‌ها در اسکارن سرانجیک قروه متناسب با زمان و نزدیکی به منبع سیال متغیر است.

افزایش درصد مولی هدنبرژیت و ژوهانسنیت و درنتیجه کاهش درصد مولی دیوپسید در کلینوپیروکسن و نیز افزایش درصد مولی آندرادیت و کاهش درصد مولی آلماندین+ اسپسارتین در گارنت ارتباط مستقیمی با پهنه‌های شیلیت‌دار دارد، به‌طوری‌که پهنه‌های دربردارنده گارنت با درصد مولی بالایی از آلماندین (گارنت نوع III) فاقد هرگونه کانی شیلیت است. چنین ارتباطی در اسکارن مورد بررسی می‌تواند راهنمای اکتشافی برای پهنه‌های شامل شیلیت باشد.

ترکیب نسل‌های گوناگون کلینوپیروکسن و گارنت در اسکارن سرانجیک قروه نشان‌دهنده روند دگرگونی اسکارن پیشرونده از شرایط نسبتا اکسایشی تا نسبتا کاهشی و گریزندگی اکسیژن معادل با ۱۸- تا ۳۰- است.

قدردانی

نویسندگان از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور به خاطر حمایت مالی در انجام طرح پژوهشی به شماره ۹۱۰۵۸۰۵۲ تشکر و قدرانی می‌نمایند.

مراجع

[1] Cepedal A., Martin-Izard A., Reguilón R., Rodrıguez-Pevida L., Spiering, E., González-Nistal S., *"Origin and evolution of the calcic and magnesian skarns hosting the El Valle-Boinás copper–gold deposit, Asturias (Spain)",* Journal of Geochemical Exploration 71 (2000) 119–151.

[2] Ciobanu C.L., Cook N.J., *"Skarn textures and a case study: the Ocna de Fier-Dognecea orefield, Banat, Romania",* Ore Geology Review 24 (2004) 315–370.

[3] Grammatikopoulos T.A., Clark A.H., *"A comparative study of wollastonite skarn genesis in the Central Metasedimentary Belt, southeastern Ontario, Canada",* Ore Geology Review 29 (2006) 146–161.

[4] Meinert L.D., *"Compositional variation of igneous rocks associated with skarn deposits-chemical evidence for a genetic connection between petrogenesis and mineralization"*, Mineralogical Association of Canada, Short Course Series (1995) 23pp. 401–418.

[5] Lehrmann B., Oliver N.H., Rubenach M.J., Georgees C., *"The association between skarn mineralisation and granite bodies in the Chillagoe region, North Queensland, Australia",* Journal of Geochemical Exploration 101 (2009) 58.

[6] Meinert L.D., Dipple G.M., Nicolescu S., *"World skarn deposits",* Society of Economic Geologists, Economic Geology 100th Anniversary (2005) 299–336.

[7] Einaudi M.T., Burt D.M., *"Introduction-terminology, classification, and composition of skarn deposits",* Economic Geology 77 (1982) 745-754.

[8] Gaspar M., Knaack C., Meinert L.D., Moretti R., *"REE in skarn systems: a LA-ICP-MS study of garnets from the Crown Jewel gold deposit",* Geochimica et Cosmochimica Acta 72 (2008) 185-205.

[9] Gao Y.B., Li W.Y., Qian B., Li D.S., He S.Y., Zhang Z.W., Zhang J.W., *"Geochronology, geochemistry and Hf isotopic compositions of the*

granitic rocks related with iron/mineralization in Yemaquan deposit, East Kunlun, NW China", Acta Petrollei Sinica 30 (2014) 1647-1665 (in Chinese with English abstract).

[10] Somarin A.K., *"Garnet composition as an indicator of Cu mineralization: evidence from skarn deposits of NW Iran",* Journal of Geochemical Exploration 81 (2004) 47-57.

[11] Liu J.N., Feng C.Y., Zhao Y.M., Li D.X., Xiao Y., Zhou J.H., Ma Y.S., *"Characteristics of intrusive rock, metasomatites, mineralization and alteration in Yemaquan skarn Fe– Zn polymetallic deposit, Qinghai Province",* Mineral Deposits 32 (2013) 77-93 (in Chinese with English abstract).

[12] Zhai D.G., Liu J.J., Zhang H.Y., Wang J.P., Su, L., Yang, X.A., Wu S.H., *"Origin of oscillatory zoned garnets from the Xieertala Fe-Zn skarn deposit, northern China: in situ LA-ICP-MS evidence",* Lithos 190 (2014) 279-291.

[13] Arai H., *"A function for the R programming language to recast garnet analyses into end-members: Revision and porting of Muhling and Griffin's method",* Computer and Geoscience 36 (2010) 406-409.

[14] Yavuz F., *"WinPyrox: A Windows program for pyroxene calculation classification and thermobarometry"*, American Mineralogists 98 (2013) 1338-1359.

[15] Mohajjel M., Fergusson C.L., Sahandi M.R., *"Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan zone, western Iran",* Journal of Asian Earth Sciences, 21 (2003) 397-412.

[16] Dilek Y., Imamverdiyev N., Altunkaynak S., *"Geochemistry and tectonics of Cenozoic volcanism in the Lesser Caucasus (Azerbaijan) and the peri-Arabian region: collision-induced mantle dynamics and its magmatic fingerprint",* International Geology Review 52 (2010) 536-578.

[17] Hosseini M., *"Geological map of Qorveh",* Geological Survey of Iran, scale 1:100000 (1999).

[18] Azizi H., Mohammadi K., Asahara Y., Tsuboi M., Daneshvar N., Mehrabi B., *"Strongly peraluminous leucogranite (Ebrahim-Attar granite) as evidence for extensional tectonic regime in the Cretaceous, Sanandaj-Sirjan zone, northwest Iran",* Chemie der Erde 76 (2016) 529-541.

[19] Azizi H., Zanjefili-Beiranvand M., Asahara Y., *"Zircon U-Pb ages and petrogenesis of a tonalite trondhjemite–granodiorite (TTG) complex in the northern Sanandaj-Sirjan zone, northwest Iran: Evidence for Late Jurassic arc-continent collision",* Lithos 216-217 (2015) 178-195.

[20] Azizi H., Asahara Y., *"Juvenile granite in the Sanandaj–Sirjan zone, NW Iran: Late Jurassic-Early Cretaceous arc-continent collision",* International Geology Review 55 (2013) 1523-1540.

[21] Mahmoudi S., Corfu F., Masoudi F., Mehrabi B., Mohajjel M., *"U-Pb dating and emplacement history of granitoid plutons in the northern Sanandaj-SirjanZone, Iran",* Journal of Asian Earth Science 41 (2011) 238-249.

[22] Dick L.A., Hodgson C.J., *"The MacTung W-Cu(Zn) contact metasomatic and related deposits of the northeastern Canadian Cordillera",* Economic Geology 77 (1982) 845-867.

[23] Steven N.M., Moore J.M., *"Pan-African tungsten skarn mineralization at the Otjua prospect, Central Namibia",* Economic Geology 89 (1993) 1431-1453.

[24] Newberry R.J., *"Tungsten-bearing skarns of the Sierra Nevada, The Pine Creek Mine, California",* Economic Geology 77 (1982) 823-844.

[25] Zaw K., Singoyi B., *"Formation of magnetite-scheelite skarn mineralization at Kara, northwestern Tasmania: Evidence from mineral chemistry and stable isotopes",* Economic Geology 95 (2000) 1215-1230.

[26] Orhan A., *"Evolution of the Mo-rich scheelite skarn mineralization at Kozbudaklar, Western Anatolia, Turkey: Evidence from mineral chemistry and fluid inclusions",* Ore Geology Review 80 (2017) 141-165.

[27] Zaw K., *"The CanTung E-Zone orebody, tungsten, Northwest Territories: A major scheelite skarn deposit"*, M.Sc. thesis, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada (1976) 327 p. (unpublished).

[28] Kwak T.A.P., Tan T.H., *"The geochemistry of zoning in skarn minerals at the king Island (Dolphin) mine",* Economic geology 76 (1981) 468-497.

[29] Einaudi M.T., Meinert L.D., Newberry R.J., *"Skarn deposits"*, Society of Economic Geologists, Economic Geology 75th Anniversary (1981) 317-391.

[30] Berger J., Femenias O., Mercier J.C.C., Demaiffe D., *"Ocean floor hydrothermalmetamorphismin Limousin ophiolites (Western French Massif Central): evidence of a rare preserved Variscan oceanic marker",* journal of Metamorphic geology 23 (2005) 795-812.

[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.69]

M.Sc. thesis, University of Utah, (1980) 154 pp (Unpublished).

[40] Hochella JR. M.F., Liou J.G., Keskinen M.J., Kim H.S., *"Synthesis and stability relations of magnesium idocras",* Economic Geology 77 (1982) 798-808.

[41] Dobson D.C., *"Geology and alteration of the Lost River tin-tungsten-fluorine deposit, Alaska",* Economic Geology 77 (1982) 1033-105.

[42] Shimazaki H., *"Grossular-spessartine-almandine garnets from some Japanese scheelite skarns",* Canadian Mineralogist 15 (1977) 74-80.

[43] Burton J.C., Taylor L.A., Chou I.M., *"The fO_2-T and fS_2-T stability relations of hedenbergite and of hedenbergite-johannsenite solid solutions",* Economic Geology 77 (1982) 764-783.

[44] Liou J.G., *"Synthesis and stability relations of epidote, $Ca_2Al_2FeSi_3O_{12}(OH)$",* Journal of Petrology 14 (1973) 381-41.

[45] Moecher D.P., Chou I.M., *"Experimental investigation of andradite and hedenbergite equilibria employing the hydrogen sensor technique, with revised estimates of ΔfG0 m,298 for andradite and hedenbergite",* American Mineralogists 75 (1990) 1327-1341.

[46] Haas J.L., Robie R.A., *"Thermodynamic data for wustite, $Fe_{0.947}O$ magnetite, Fe_3O_4, and hematite, Fe_2O_3",* American geophysics Union Trans. 54 (1973) 488.

[47] Simon G., Kesler S.E., Essene E.J., Chryssoulis S.L., *"Gold in porphyry copper deposits: experimental determination of the distribution of gold in the Cu-Fe-S system at 400° to 700 °C",* Economic Geology 95 (2000) 259-270.

[31] Nakano T., *"Fluctuation model for compositional heterogeneity of skarn clinopyroxenes",* Geochemical Journal 23 (1989) 91-99.

[32] Nakano T., *"An antipathetic relation between the hedenbergite and johannsenite components in skarn clinopyroxene from the Kagata tungsten deposit, Central Japan",* Canadian Mineralogist 29 (1991) 427-434.

[33] Sheikhi F., Alaminia Z., Tabakh-Shabani A.A. *"Seranjic skarn geothermometery, SW Ghorveh, Kurdestan, Iran",* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 20 (2012) 343-355 (in Persian with English abstract).

[34] Meinert L.D., Hedenquist J.W., Satoh H., Matsuhisa Y., *"Formation of anhydrous and hydrous skarn in Cu-Au ore deposits by magmatic fluids",* Economic Geology 98 (2003) 147–156.

[35] Kwak T.A.P., *"Fluid inclusions in skarns (carbonate replacement deposits)",* Journal of Metamorphic Geology 4 (1986) 363-384.

[36] Greenwood H.J., *"Wollastonite: Stability in $H_2O–CO_2$ mixtures and occurrence in a contact-metamorphic aureole near Salmo, British Columbia, Canada",* American Mineralogy 52 (1967) 1669-1680.

[37] Newton R. C., *"Somec alc-silicatee quilibrium relations",* American journal of science, 264 (1966) 204-222.

[38] Gordon T.M., Greenwood H.J., *"The stability of grossular in H_2O-CO_2 mixtures",* American Mineralogy 56 (1971) 1674-1688.

[39] Sweeney M.1., *"Geochemistry of garnets from the North Ore shoot, Bingham district, Utah",*